

# 음향 양자 이론의 사운드 디자인적 응용

구자환  
호서대학교 실용음악학과

## Theory of Acoustic Quanta and its Application on Sound Design

Jahwan Koo

Division of Applied Music, Hoseo University

**요약** 테니스 게이버(Dennis Gabor)의 음향 양자(Acoustic Quanta) 이론은 음향 합성법의 하나인 그레놀러 합성법(Granular Synthesis)의 이론적 토대가 되어 많은 컴퓨터 음악 작곡가들과 사운드 디자이너들에게 영감을 주었다. 음향 양자는 1에서 100 ms의 지속시간을 가진, 시간적으로 더 이상 짧게 분해될 수 없는 소리를 뜻한다. 그레놀러 합성법은 원음을 매우 짧은 시간 간격으로 분할하여 소리 입자들(Sound Grain)로 만든 다음, 이 소리 입자들을 조합하여 새로운 음악 또는 음색을 구현하는 방법이다. 음향 양자 개념은 그레놀러 합성법의 소재가 되는 소리 입자의 이론적 근거가 되었다. 기존 음향 합성법과는 전혀 다른 음색의 사운드를 만들어 낼 수 있는 그레놀러 합성법은 사운드 디자인 분야에서 다양한 용도로 사용 가능하다. 본 논문에서는 게이버의 음향 양자 개념을 소개하고 이를 그레놀러 합성법에 적용하여 활용 가능한 사운드 디자인 방법, 특히 동기식(Synchronous) 그레놀러 방식에 의한 신디사이저(Synthesizer) 제작 가능성과 그 응용에 대하여 논하였다. 연구 결과 가청주파수를 감안한 음향 양자의 지속시간은 0.239에서 33.367 ms 사이가 되어야하기 때문에 음향 양자의 본래 개념과는 차이가 있었다.

**Abstract** Acoustic Quanta, which British Physicist Dennis Gabor created, is the theoretical background for granular synthesis and has influenced many computer music artists and sound designers. Acoustic Quanta is a very short sound burst, lasting only 1 to 100 ms. Granular synthesis is a sound synthesis technique which slices original sound into sound grains and re-combines them into a new acoustic event. Concept of sound grain is borrowed from the acoustic quanta. Granular Synthesis can make very unique sound, so that it can be useful in many ways, especially in sound design. This paper presents concept of acoustic quanta and granular synthesis. It then discusses making a synthesizer as an implementation of synchronous granular synthesis and its applications on sound design. As a result, the duration of acoustic quanta should range between 0.239 and 33.367 ms, in consideration of audible frequencies, which is different from the original concept of the acoustic quanta.

**Keywords :** Acoustic Quanta, Grain Envelope, Granular Synthesis, Sound Design, Sound Grain

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

음향 합성법(Sound Synthesis)이란 소리를 전자적으로 조정하는 방법으로서, 여기서 이야기하는 “전자적” 방식은 전자 기기나 컴퓨터 소프트웨어 등 아날로그와

디지털 방식을 통칭한다. 음향 합성법은 감산 합성법(Subtractive Synthesis), 가산 합성법(Additive Synthesis), 주파수 변조 합성법(FM Synthesis) 등 여러 가지 방식이 있는데, 이 방식들은 각각 다양한 음색의 전자음을 만들 수 있다.

그레놀러 합성법(Granular Synthesis)은 비교적 최근

\*Corresponding Author : Jahwan Koo(Hoseo Univ.)

Tel: +82-31-897-5302 email: thirdear@naver.com

Received August 3, 2018

Revised September 6, 2018

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

에 개발된 음향 합성법으로서, 음향 합성의 재료로 쓰일 음원을 매우 짧은 시간으로 분절화한 뒤, 이 분절된 소리의 파편들을 일정한 규칙에 의거해 재구성하여 새로운 소리를 만드는 방식이다. 이렇게 재구성된 새로운 소리는 원래의 소리와는 완전히 다른 음색을 갖게 되기 때문에 늘 새로운 음색을 필요로 하는 사운드 디자인 분야에서 각광받는 음향 합성법이다.

이러한 그레놀러 합성법의 이론적 토대가 되는 개념이 음향 양자(Acoustic Quanta)이다. 음향 양자는 시간적으로 더 이상 짧아질 수 없을 정도로 매우 잘게 분해된 소리의 조각들이다. 이러한 소리의 파편들을 재구성하여 총체적/총합적 사운드를 만드는 것이 바로 그레놀러 합성법이다.

본 논문에서는 그레놀러 합성법의 이론적 토대가 되는 데니스 게이버(Dennis Gabor)의 음향 양자 개념을 소개하고, 그레놀러 합성법의 사운드 디자인적 응용 사례와 가능성에 대해 연구하였다.

## 1.2 연구의 방법과 범위

그레놀러 합성법의 사운드 디자인적 응용 사례는 수 없이 많고 그 응용 방법 또한 무궁무진하다. 그레놀러 합성법을 사용하면 음색을 특정할 수 없는, 또는 음색이 끊임없이 변하는 소리를 얼마든지 만들 수 있다. 이러한 무작위적인 음색 변화를 예술적 알고리즘으로 이론화하거나, 상업적 활용도를 발견하는 것은 사운드 아티스트와 사운드 디자이너의 역할이기 때문에 본 논문의 주된 목적과는 거리가 있다. 본 논문에서는 그레놀러 합성법 중에서도 비교적 상업적 활용도가 높은 방식인 동기식 그레놀러 합성법(Synchronous Granular Synthesis)의 사운드 디자인적 활용법에 대하여 연구하였다.

## 2. 본론

### 2.1 역사

푸리에(J. B. J. Fourier)와 헬름홀츠(H. von Helmholtz)가 확립한 고전적인 음향학에 따르면, 복잡한 음색과 일정한 음고를 가진 소리(Complex Periodic Sound, 복합음)은 정수비의 주파수를 가진 순음(Pure tone, 사인파)들의 합, 즉 근음(Fundamental)과 배음들(Harmonics)의 합으로 분리된다. 이를 수학적으로 기술한 것이 푸리에

변환(Fourier Transformation)이다. 이렇게 복잡한 신호 형태의 소리를 푸리에 변환을 통해 주파수 성분들로 분해하는 작업을 소리의 주파수 영역 표현(Frequency - Domain Representation)이라고 한다. 이러한 분석을 통하여 우리는 어떤 소리가 가진 주파수 성분, 즉 그 소리의 스펙트럼을 알 수 있다. 그러나 푸리에 변환의 문제점은 오직 음색이 변하지 않는(스펙트럼이 고정된) 기계적 합성음에만 적용 가능하다는 것이다. 복잡하게 변하는 음색을 가진 자연음에 대해서는 오직 시간을 멈춘 한 순간의 스펙트럼만을 분석 가능했고, 그 이전과 이후의 스펙트럼 변화에 대해서는 알 수가 없었다. 따라서 푸리에 는 자연음의 스펙트럼이 시간에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 문제를 해결하였다. 복잡한 문제를 해결하기 위한 과학적 단순화는 수학적 모델링에 있어 필연적인 과정이지만, 현실에서 일어나는 모든 음향적 사건에서 소리의 음색은 시간에 따라 변화한다. 따라서 고전적 음향학의 소리 분석을 일상의 소리에 그대로 적용하는 데에는 무리가 있었다. Fig. 1은 소리의 스펙트럼을 보여주는 주파수 영역 표현의 한 예이다. 주파수 영역 표현에서 X축은 주파수(Hz)를, Y축은 데시벨(dB) 값을 나타낸다.

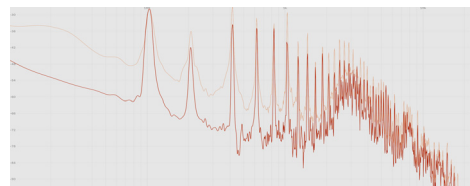


Fig. 1. Frequency-domain representation of sound

한편 시간에 따른 소리 크기의 변화라는 관점에서 소리를 분석하는 방법이 있는데, 이를 소리의 시간 영역 표현(Time - Domain Representation)이라고 한다. 이 방법은 소리를 시간적으로 시각화하여 보여주기 때문에 소리가 언제 시작하고 언제 끝나는지, 언제 커지고 언제 작아지는지 등을 시각적으로 확인할 수 있다는 장점이 있지만, 소리의 스펙트럼, 즉 주파수 분포를 보여주지는 못했다. Fig. 2는 소리의 시간 영역 표현의 한 예이다. 시간 영역 표현에서 X축은 시간을, Y축은 데시벨(dB) 값을 나타낸다.

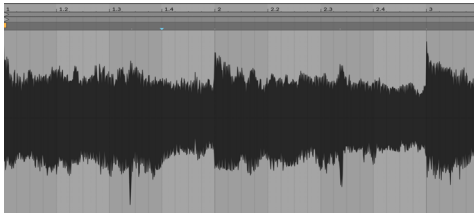


Fig. 2. Time-domain representation of sound

주파수 영역 표현은 소리의 스펙트럼, 즉 음색을 시각화하여 보여주기 때문에 이를 통해 우리는 이 소리가 어떤 소리인지를 대략적으로나마 파악할 수 있다. 그러나 우리는 이 소리가 언제 시작되었는지, 언제 끝나는지, 어떻게 변하는지에 대해서는 알 수 없다. 반면 시간 영역 표현은 소리가 시간적으로 어떻게 변하는지를 보여주지만, 그 소리가 어떤 음색을 갖고 있는지에 대해서는 알려주지 않는다. 따라서 소리의 주파수 영역 표현과 시간 영역 표현을 통일시키는 것은 음향학의 중요한 목표 중 하나였다.

### 2.2 음향 양자의 개념

데니스 게이버(Dennis Gabor)는 영국의 저명한 전기공학자이자 물리학자로서, 홀로그래피의 발명으로 1971년 노벨 물리학상을 수상하기도 한 인물이다. 그는 푸리에와 헬름홀츠와는 달리 소리를 끝없이 이어지는 주기함수로 보지 않고, 대신 양자 역학의 관점을 음향학에 도입했다. 소리를 아주 짧은 시간 간격으로 잘게 분리하면 그 하나하나의 분절음들은 더 이상 서로 다른 음색으로 들리지 않고 그저 하나의 클릭 음으로 들리게 된다. 소리를 음색 특성이 무시되기 직전 상태까지 분리하면, 원음의 음색을 유지한 상태에서 시간적으로 최대한 짧게 잘라낸 분절된 조각들을 얻을 수 있다. 이 소리 조각들을 게이버는 음향 양자(Acoustic Quanta)라고 명명했다. 음향 양자가 유지되는 지속시간은 충분히 짧기 때문에 어떠한 음색 변화도 무시할 수 있다. 즉, 음향 양자들의 음색은 단일화된다. 이러한 단일화는 시간-주파수 영역 분석(Time-Frequency Domain Analysis)에서 시간 영역을 고정시켜 소리의 주파수 영역 분석을 오류 없이 안정적으로 실행할 수 있게 해 준다[1].

게이버의 음향 양자는 시간과 주파수의 2차 함수로 기술된다. 그에 따르면 모든 소리는 수많은 음향 양자들

의 총합이므로, 소리는 단일한 음향 양자를 매개 변수로 하는 함수로 치환될 수 있다. 음향 양자들은 각각 서로 다른 지속시간  $\Delta t$ 와 유효 주파수 범위  $\Delta f$ 를 갖는다. 음향 양자를 매개변수로 기술되는 소리의 방정식  $g(t)$ 는 식 (1)과 같다[2].

$$g(t) = e^{-a^2(t-t_0)^2} \times e^{2\pi j f_0 t} \tag{1}$$

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\pi}}{a}, \text{ and } \Delta f = \frac{a}{\sqrt{\pi}} \tag{2}$$

식 (2)에서  $\Delta t$ 와  $\Delta f$ 가 서로 역수인 것은 자명하다. 왜냐하면 주기(지속시간)와 주파수는 역수 관계이기 때문이다.

방정식의 첫 부분에 나오는  $e^{-a^2}$ 은 이 방정식의 모양이 가우스 함수를 따를 것임을 보여준다. 정규분포로 유명한 가우스 함수의 그래프는 종을 뒤집어 놓은 모양이고, 음향 양자의 엔벨로프(Envelope) 또한 가우스 함수의 모양을 따른다. Fig. 3은 가우스의 정규 분포 그래프를, Fig. 4는 음향 양자의 엔벨로프를 각각 나타낸다. 두 그림 모두 시간 영역 표현이므로 X축은 시간을, Y축은 데시벨(dB) 값을 나타낸다.

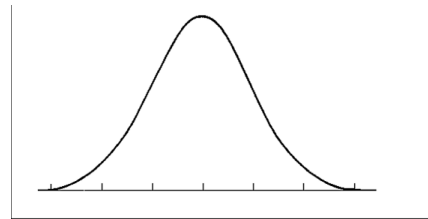


Fig. 3. Waveform of an Gaussian Function

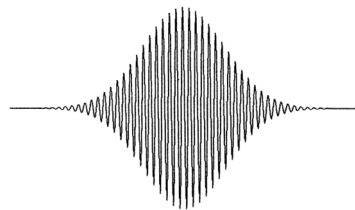


Fig. 4. Waveform of an acoustic quantum

게이버의 이론은 궁극적으로 소리를 매우 짧은 시간으로 잘게 분해한 다음 푸리에의 주파수 영역 분석을 시

행하면 더 정확한 분석이 가능하다는 것이다. 충분히 짧은 시간으로 분해된 소리들은 개별 음색의 차이를 무시할 수 있기 때문이다. 한 프레임씩 스냅샷으로 찍힌, 즉 시간적으로 미분화된 음향 양자들의 순차 배열 (Sequence)은 그 소리의 스펙트럼이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다.

### 2.3 그레놀러 합성법

그레놀러 합성법은 게이버의 이론에 의한 소리의 시간-주파수 분석을 역순으로 배치함으로써 작동한다. 그레놀러 합성법에서는 소리를 합성하기 이전에 원재료가 될 소리를 미리 분석한다. 미리 분석되어 시간적으로 매우 짧게 분절된 소리 파편을 그레놀러 합성법에서는 소리 입자(Sound Grain)라고 부르는데, 이는 게이버의 음향 양자 개념을 차용한 것이다. 그레놀러 합성법은 이 소리 입자들을 원래 배치와는 다른 방식으로 조합하여 새로운 소리를 만든다. 그레놀러 합성법과 같이 미리 준비 (분석)된 소리를 재배치하여 새로운 음향을 만드는 방식을 음향 분석 - 재합성법(Sound Analysis - Resynthesis)이라고 부른다[3].

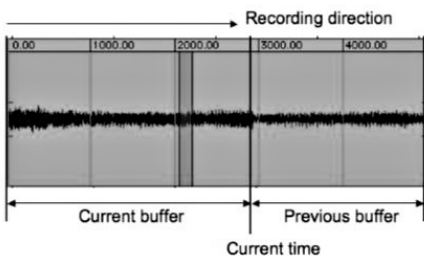


Fig. 5. Time-domain representation of a sound grain

Fig. 5는 소리 입자를 시간 영역에서 추출하는 모습을 시각화한 것이다. 중앙에 짙은 색으로 분리된 것이 소리 입자이다. 소리 입자는 원음의 여러 부분에서 만들 수도 있고 일부분만 사용하여 만들 수도 있다. 우리는 이 소리 입자들을 모아 한꺼번에 여러 입자들을 동시에 소리나게 할 수도 있고, 또는 시간적으로 배열하여 순차적으로 소리나게 할 수도 있다. 전자의 방식으로 만들어진 소리를 Sound Cloud 또는 Sound Matirce라고 하고, 후자의 방식으로 만들어진 소리를 Sound Stream 또는 Sound Sequence라고 한다[4].

그레놀러 합성법은 소리 입자에 엔벨로프(Envelope)를 적용하여 그 결과음을 얻는다. 엔벨로프는 소리가 발생해서 사라지는 과정에서 소리 크기의 변화의 양상을 의미한다. 가장 일반적인 형태의 엔벨로프는 소리 크기 변화의 과정을 어택(Attack), 서스테인(Sustain), 디케이(Decay), 릴리즈(Release)의 4단계로 세분화하여 나타내는데, 이를 줄여 ADSR이라고도 부른다. Fig. 6은 가장 일반적인 형태의 엔벨로프이다. 여기서 X축은 시간을, Y축은 데시벨(dB) 값을 나타낸다. 즉, 엔벨로프는 소리의 발생부터 소멸까지의 소리 크기 변화를 도식화한 것이다.



Fig. 6. Envelope of Sound (ADSR Curve)

소리 입자에 적용되는 엔벨로프를 그레인 엔벨로프 (Grain Envelope)라고 한다. 그레인 엔벨로프는 일반적으로 소리 입자와 같은 지속시간을 갖고, 그 모양은 음향 양자의 파형(Fig. 4)을 기본으로 하되 여러 가지 변형된 형태를 취할 수 있다[5].

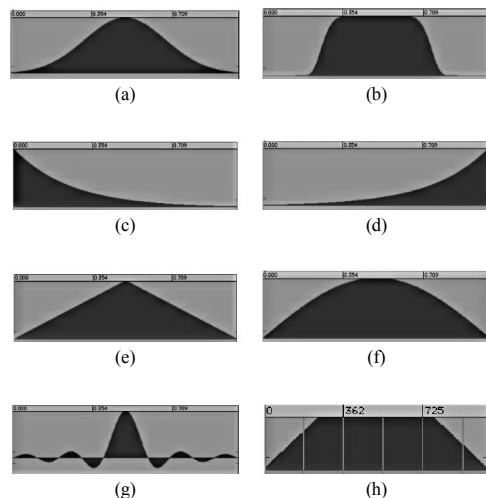


Fig. 7. Grain Envelopes

- (a)Gaussian (b)Quasi - Gaussian (c)Expodec (d)Rexpodec (e)Triangular (f)|sind(x)| (g)Sync Function (h)3-stage Linear

Fig. 7은 다양한 그레인 엔벨로프들을 시간 영역에서 시각화한 것이다. 그레인 엔벨로프들은 각각 서로 다른 스펙트럼을 갖는데, 그 주파수 분포는 엔벨로프의 지속 시간에 따라 다르다. 이처럼 다양한 파형의 그레인 엔벨로프들을 사용하면 같은 소리 입자들을 사용하더라도 서로 다른 음색의 결과음을 얻을 수 있다.

### 2.4 그레놀러 합성법의 종류

그레놀러 합성법에서 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간은 일정할 수도 있고 일정하지 않을 수도 있다. 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간이 일정하게 유지되는 경우를 동기식(Synchronous) 그레놀러 합성법이라 하고, 지속시간이 불규칙하게 변하는 경우를 비동기식(Asynchronous) 그레놀러 합성법이라 한다. 그 차이는 합성 결과음의 음색에 큰 영향을 미칠 수 있다[6].

그레놀러 합성법은 소리 입자의 배치(동시적 또는 순차적) 형태, 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간의 규칙성(동기식 또는 비동기식) 여부에 따라 Table 1과 같이 네 가지로 분류된다. 동기식 그레놀러 합성법으로 만들어진 소리 입자들이 동시에 소리 날 경우 복잡한 음정을 가진 무작위적인 음색의 결과음을 얻는다. 반면 일정한 지속시간을 가진 소리 입자들이 시간적으로 질서 있게 배치되어 순차적으로 소리 날 경우 일정한 음정과 일정한 음색을 가진 소리를 결과음으로 얻게 된다[7].

Table 1. Types of Granular Synthesis

	Synchronous	Asynchronous
At the same time	Pitch-synchronous complex tone	Sound cloud
In sequence	Pitched sound	Sound stream

비동기식으로 만들어진 소리 입자들이 한꺼번에 소리 날 경우, 그레놀러 합성법 특유의 매우 독특한 음색의 소리를 얻을 수 있고, 이는 사운드 아티스트나 사운드 디자이너들의 작품에 많이 활용된다. 이러한 비동기식 결과물이 순차적으로 배치되어 활용되면 시간에 따라 변화하는 다양한 음색의 사운드 아트 작품이 탄생한다[8].

네 가지 그레놀러 합성법 모두 사운드 디자인에서의 응용 사례와 관련 어플리케이션들이 많지만, 본 논문에서

서는 상업적 용도가 가장 큰 동기식 순차 배열 그레놀러 합성법에 대한 사운드 디자인적 응용 방법에 대하여만 연구하였다.

### 2.5 사운드 디자인적 응용

게이머에 따르면 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간은 1에서 100 ms 사이에서 설정되고, 이 설정은 고정될 수도 있고 계속 변할 수도 있다. 소리는 공기와 같은 매질의 진동으로 이루어져 있기 때문에 고유의 주기(period)와 주파수(frequency)를 갖는다. 주기와 주파수의 관계를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$f = \frac{1}{p} \tag{3}$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $p$ 는 주기를 뜻한다. 즉, 주기와 주파수는 서로 역수의 관계에 있다. 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간이 일정하다고 할 때, 그레인 엔벨로프가 순차적으로 배치되어 배치되면 그레인 엔벨로프 자체가 하나의 규칙적인 패턴의 파형을 이루게 되고, 이 파형의 주기는 곧 그레인 엔벨로프의 지속시간이 된다. 이 주기(= 지속시간)는 일정하기 때문에 일정한 주파수를 형성하여, 그레놀러 합성의 결과음은 일정한 음정을 가진 소리가 된다.

예를 들어 그레인 엔벨로프의 지속시간이 각각 1 ms와 10 ms라면, 그레놀러 합성에 의한 결과음의 주파수는 각각 1,000 Hz, 100 Hz이다. 만약 지속시간이 변하지 않는다면 결과음은 일정한 음정을 가진 소리가 된다. 따라서 동기식 그레놀러 합성법은 그레인 엔벨로프의 지속시간을 조절함으로써 원하는 음정의 소리를 얻을 수 있게 되는데, 이는 곧 그레놀러 합성법이 전자 악기인 신디사이저(Synthesizer)에 활용될 수 있음을 의미한다. 원하는 음정을 자유자재로 낼 수 있어야 악기로서의 활용도가 생기고, 다른 악기들과의 협연도 가능하다. 신디사이저는 사운드 디자인 작업에도 필수적인 장비이다. 신디사이저를 사용하면 각종 매개 변수들을 조절하여 원하는 음색을 자유자재로 얻을 수 있기 때문이다.

Fig. 8은 동기식 그레놀러 합성법을 도식화한 것이다. Fig. 8 - (a)는 어떤 여성의 목소리 음원으로부터 잘라낸 소리 입자이고 그 지속시간은 16 ms이다. Fig. 8 - (b)는 Fig. 8 - (a)를 연속적으로 반복하여 순차적으로 배열한 것이다. 그레인 엔벨로프는 Fig. 7 - (h)를 사용하였다. 그 결과 우리가 듣게 되는 소리는 주기가 16 ms, 주파수

가 62.5 Hz인 일정한 음정을 갖는 소리이고, 그 음색은 여성의 목소리를 닮은 소리이다. 다시 말하면 우리는 여성의 목소리를 음색으로 하는 신디사이저를 갖게 된 것이다.

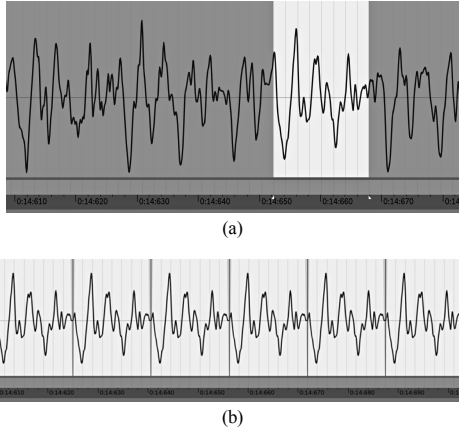


Fig. 8. Synchronous Granular Synthesis  
(a) A sound grain with duration of 16 ms  
(b) Repeated pattern of the sound grains in synchronous sequence

## 2.6 음향 양자의 실용적 한계

전통적으로 악기의 음정과 주파수의 관계는 440 Hz를 A음으로 정하고, 식 (4)와 같은 평균을 법칙을 따른다.

$$f = \sqrt[12]{2} \cdot f_0 \quad (4)$$

여기서  $f_0$ 와  $f$ 는 반음 차이이다. 예를 들어 A# 음정의 주파수를 구하고자 한다면,

$$f = \sqrt[12]{2} \cdot 440 = 466.1638 \quad (5)$$

즉, A# 음정의 주파수는 약 466 Hz이다. 한편 1,000 Hz의 음정은 B와 C 사이이고, 100 Hz의 음정은 G와 G# 사이이다. A음인 440 Hz의 주기는 주파수의 역수인 2.272 ms이다. 즉, 그레놀러 합성법을 통해 지속적인 A음을 얻고자 한다면 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간을 각각 2.272 ms로 설정하면 된다.

Table 2는 음정과 주파수 관계를 기준으로 계산한 그레인 엔벨로프의 지속 시간이다. 피아노의 88개 음정을 모두 계산해 보면, 가장 낮은 음정인 27.5 Hz의 A음은

36.367 ms의 일정한 지속시간을 갖는 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 결합으로 만들어진다. 여기서 피아노를 예로든 이유는 피아노가 가장 실용적인 악기이고, 또 전자악기인 신디사이저의 원형이기 때문이다.

Table 2. Relationship between Pitch, frequency and duration of grain envelope

pitch	frequency	duration of grain envelope
A	220 Hz	4.545 ms
A#	233.0819 Hz	4.290 ms
B	246.9417 Hz	4.050 ms
C	261.6256 Hz	3.822 ms
C#	277.1826 Hz	3.608 ms
D	293.6648 Hz	3.405 ms
D#	311.1270 Hz	3.214 ms
E	329.6276 Hz	3.034 ms
F	349.2282 Hz	2.863 ms
F#	369.9944 Hz	2.703 ms
G	391.9954 Hz	2.551 ms
G#	415.3047 Hz	2.408 ms
A	440 Hz	2.273 ms

Table 2는 또한 한 옥타브 차이가 나는 같은 음정의 소리는 주파수 비율이 2 : 1이라는 것을 보여준다. 주기의 비율은 그 역수인 1 : 2가 된다. 따라서 어느 한 옥타브 내에서의 음정 - 주파수 관계를 알면 이를 토대로 모든 옥타브 대역에서의 음정 - 주파수 관계를 알 수 있다. 예를 들어 Table 1의 E음보다 한 옥타브 높은 E음의 주파수는 659.2552 Hz이다.

피아노의 가장 높은 건반의 음정은 C이다. Table 2에서 C음의 주파수는 261.6256 Hz인데, 주파수가 2배가 될수록 음정은 한 옥타브씩 올라가게 되므로, 피아노의 가장 높은 건반음의 주파수는 4,186.0096 Hz가 된다. 따라서 해당 음정을 내기 위한 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속 시간은 0.239 ms이다. 즉, 피아노의 음정에 대응하는 그레놀러 신디사이저를 만들려면 소리 입자와 그레인 엔벨로프의 지속시간이 0.239에서 33.367 ms 사이 여야 하는데, 이는 게이머가 처음에 제시한 음향 양자의 지속시간인 1에서 100 ms와는 큰 차이가 있다.

### 3. 결론

게이버의 음향 양자 개념은 그레놀러 합성법의 이론적 근거를 제시하였으나, 그가 제시한 음향 양자의 지속시간 범위는 실용적으로 활용 가능한 지속시간과는 다소 차이가 있었다. 게이버가 제시한 음향 양자의 적절한 지속시간은 1에서 100 ms였다. 그런데 피아노의 가장 높은 건반 음에 부합하는 음정을 그레놀러 합성법으로 만들어내려면 0.239 ms라는 소리 입자의 지속시간이 필요하다. 이는 게이버의 음향 양자 이론에는 부합하지 않는 너무 짧은 지속시간이다. 또한 게이버가 제시한 지속시간의 최대치인 100 ms를 소리 입자의 지속시간에 대응하면 주파수가 10 Hz인 결과음을 얻는데, 이는 음정으로 치환 불가능한 주파수이다. 왜냐하면 인간이 귀로 들을 수 있는 가청주파수의 범위는 20에서 20,000 Hz이기 때문에, 10 Hz의 주파수는 소리로 들리지 않는다.

이처럼 게이버가 비교적 긴 지속시간을 음향 양자의 지속시간으로 설정한 이유는 그가 음향 양자 이론을 발표한 시기에는 아직 디지털 음향 기술이 실용화되기 이전이었기 때문이다. 그 시기에 존재하는 아날로그 음향 장비로는 소리를 시간적으로 분해할 수 있는 최고 해상도가 1 ms였던 것이다. 그런데 1980년대에 실용화된 CD 음질 수준의 디지털 음향 기술로는 0.023 초까지 지속시간을 짧게 설정하는 것이 가능하고, 이는 피아노의 가장 높은 건반음보다 약 10배 더 높은 주파수를 만들어 낼 수 있는 수준이다. 21세기에는 디지털 음향 기술이 보다 더 발전했기 때문에 훨씬 더 짧은 소리 입자들을 만들 수 있다.

이처럼 게이버의 시대에는 음향 양자가 실용화되기에는 기술적 한계들이 존재했지만, 디지털 음향 기술이 발전한 현대에는 음향 양자의 지속시간을 현저하게 줄이는 것이 가능해지면서 그레놀러 합성법이라는 실용적인 기술로 거듭나게 되었다. 그레놀러 합성법은 기존의 음향 합성법이 만들어내지 못하는 독특한 음색의 소리들을 창조해냄으로써 현대 컴퓨터 음악 발전에 지대한 영향을 미쳤다. 이론적 가능성에만 머물러 있던 그레놀러 합성법은 21세기 음향 기술의 발전과 함께 실용화되면서 컴퓨터 음악 작곡가들과 사운드 디자이너들에게 많은 영감과 도움을 주고 있다.

### References

- [1] D. J. E. Nunn, A. Purvis, P. D. Manning, "Acoustic Quanta," ICMC Proceedings, Vol. 1996, p.52-54, 1996.
- [2] D. Gabor, "Acoustic Quanta and the Theory of Hearing," Nature, Vol. 159, p.591-594, 1947.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/159591a0>
- [3] E. R. Miranda, "Computer Sound Design: Synthesis Techniques and Programming," Focal Press, USA, p.103, 2002.
- [4] C. Roads, "Microsound," MIT Press, USA, p.58-59, 2004.
- [5] C. Roads, "Computer Music Tutorial," MIT Press, USA, p.170, 1996.
- [6] B. Truax, "Music and Science Meet at the Micro Level: Time-Frequency Methods and Granular Synthesis," The Journal of the Acoustic Society of America, vol. 117, No. 4, p.2415, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4786339>
- [7] C. Roads, "Microsound," MIT Press, USA, p.90, 2004.
- [8] D. L. Jones, T. W. Parks, "Generation and Combination of Grains for Music Synthesis," Computer Music Journal, Vol.12, No. 2, p.27, 1988.  
DOI: <https://doi.org/10.2307/3679939>

### 구 자 환(Jahwan Koo)

[정회원]



- 2008년 8월 : New York Univ. Steinhardt School of Education (뮤직 테크놀로지 석사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 강사
- 2018년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 일반대학원 박사과정 (대중음악 전공)

<관심분야>  
뮤직 테크놀로지